

Abstract of EP 995 904

The system has a rotor with at least two blades (B) with adjustable angles of attack and a transducer (KB,KR,KT) which provides a measurement parameter giving a measure of the current load on an element of the system's structure. The blade angle is adjusted depending on the measurement parameter, which represents an acceleration or deformation of the structural element and gives a measure of a force or torque. The transducer is mounted in a rotor blade and/or the rotor blades are individually adjustable.

Machine translation of EP 995 904 provided by espacenet

Notice: This translation is produced by an automated process; it is intended only to make the technical content of the original document sufficiently clear in the target language. This service is not a replacement for professional translation services. The esp@cenet® Terms and Conditions of use are also applicable to the use of the translation tool and the results derived therefrom.

[0001] The invention concerns a wind-powered device in accordance with the generic term of the requirement 1.

[0002] With large wind-powered devices (WKA) the machine-structural components are dimensioned not after the middle loads produced by the wind, but almost exclusively by from the constant fluctuations of the wind load caused load swinging widths and load peaks (extreme loads).

[0003] In the past attempts were often undertaken to reduce the load fluctuations by means of joints at the read-transferring component interfaces. Examples for this are the impact and drag hinges usual in the helicopter technology or the introduction of the pendulum hub for two-sheet rotors.

[0004] A further variant was realized with a British test range, with which the joints were shifted by the turning system into the standing system (S. Fig 4). There then two joints greed and pitch camps standing perpendicularly one on the other are necessary, which store the entire machine car flexibly. All these concepts failed so far because of the fact that the joints strike with böigem wind frequently into the notices necessary for geometrical reasons.

[0005] Another beginning for the reduction of the dynamic load portions is the active absorption of driving rank oscillations, for example well-known from the propulsion technology, by a co-ordinated automatic control loop. With this is already realized number of revolutions-variable WKA.

[0006] Further it is well-known from the German disclosure writing DE 33 08 566 A1 to plan on the tower of a wind-powered device an accelerometer which produces over a sheet adjusting reference signal an adjustment of the rotor blades and thus for aerodynamic absorption of the tower.

[0007] Selective Pitchen of the rotor blades for reduction of greed or pitching moments with wind-powered devices is from DE-U-297 15,248, DE-U-297 15,249, DE-A-197 39,162 and DE-A-197 39,164 well-known, which do not rank EPÜ all among the state of the art according to the article 54 (3).

[0008] The invention is the basis the task to develop a system for the reduction of the variations in load arising in the enterprise which works on the one hand more sensitivly and on the other hand selectively at local gusts of wind.

[0009] This task is solved according to invention by the fact that the receiver is intended in a rotor blade and/or, because the rotor blades are individually adjustable.

[0010] If at least one receiver is directly in the rotor blade intended, load fluctuations are recognized and can be compensated, before they achieve the remaining construction. The effects on the construction can due to measured or empirical values be precalculated and the blade pitch angles be in

such a way limited that given loads are not exceeded. On the other hand thereby a blade pitch angle is kept, which is sufficient, in order the power demand of the generator to cover. The presented solution serves thus primarily to lower dynamic peak loads from elements to without lowering the achievement yield the plant substantially.

[0011] By selective Einzelverstellung of the rotor blades as a function of their angle position the Kraftwirkungen can be determined on the subordinate components related to the direction, so that the loads can be controlled around individual spatial axles selectively.

[0012] Evident-proves not the reduction of the torsion of the drive shaft of the generator is the goal, but the dynamic decrease of the maximum permissible loads of the constructional elements, which take up the reaction forces wind forces of the affecting the rotor. Here it is to be considered that altogether is to be regarded the loads of the constructional elements, i.e. the discharge of an element can mean the load of another. The load limitation by selective adjustment of the sheets is to be therefore selected in such a way that the maximum load limitation for each of the elements is kept. It is thus a weighting favorable, which ?programmed? selective adjustment of the sheets in the way steers that the peak load for the constructional elements are altogether lowered.

[0013] Thus the structural design can take place altogether in such a way that by delimitation of the peak loads the middle loads are altogether higher with plants, so that during same structural design higher energy yields are possible, or, alternatively, with same energy yield a more economical building method can be realized.

[0014] During a preferential further training of the wind-powered device according to invention a rule device is intended, which changes the angle of incidence of the sheet or the sheets in such a manner that the measured variable or in the element an upstream element arising and due to the constructional conditions a figure or a one corrected for the basis of the measured variable from several individual such figures size of a given importance, in particular temporal average value, cumulated, not beyond a given measure deviate.

[0015] With the elements mentioned it concerns in particular a rotor blade, the driveshaft, the generator car and/or the tower and its foundation (with on shore plants) and/or. Establishment (with offshore plants).

[0016] During a favourable further training in particular the effect of the rule device depends on the angle position of the sheet as a function of the rotor position.

[0017] This is converted concretely by a rule device, which on-line in the plant enterprise compensates or at least substantially lowers the dynamic system loads with the existing control parameters due to measurable sizes. Infrage coming control parameters are essentially the blade angles of the individual sheets (collective and selective Pitchen), the rotor speed, the generator moment (with number of revolutions-variable generator systems) and the azimuth angle (wind adjusting angle).

[0018] With this rule device it is preferentially also possible to convert those far beginnings of the articulated storage described above if the movement in the joint and their temporal derivatives are used as inputs for the rule device. Particularly favorably here the variant of free greed or azimuth camp (free yaw mentioned) is, since no notices are necessary there, in order to limit the angle of rotation. This system has the additional advantage that the Azimutsystem necessary with luffing runners (rotor on to wind-turn the side of the tower) can be void to the wind adjusting to a large extent, adjusting aerodynamically by selective Pitchen is realized.

[0019] Other favourable training further of the invention are indicated in the Unteransprüchen and/or. below together with the description of the preferential execution of the invention on the basis the figures are more near represented. Show:

Figure 1 as preferential remark example of the invention a wind force generator with force and/or Moment receivers at different building groups.

Figure 2 a schematic block diagram of the remark example represented in figure 1,

Figure 3 a first variant of the remark example represented in figure 1,

Figure 4 a second variant of the remark example represented in figure 1 as well as

Figures ä and 5b a tabular list of the dynamic load components, their causes, the effect of costs as well as their measuring and correcting variables.

[0020] With in figure 1 represented the remark example of a wind force generator with force and/or. Moment receivers KB, KR, KT at different building groups are the moment (m) and/or. Strength (F) coordinate directions x, y, z of the components sheet B, rotor axis R in the car G and tower T represented. At the toe of the coordinate systems measuring sensors for local in the elements lining up forces or moments, are which represent the current load and for example are intended in the form of strain gauges. In place of the force or moment receivers also acceleration sensors can be intended, which already take up the movements (after twice integration of the measured value), which lead to the load condition. With a rotor blade loads work by Böen to an acceleration toward - e.g., and concomitantly to a deformation in - z-direction.

[0021] The transmission and the electrical generator were let go away in figure 1 for reasons of clarity. Appropriate applies to the adjustment drives of the rotor blades.

[0022] The effects of the different sizes determined over the measuring sensors are down in figure 5 represented far.

[0023] With the schematic block diagram of an automatic control loop for the remark example after Fig, represented in figure 2. 1 in each case are the three with reading and/or. Acceleration adaptors rotor blades equipped KB with B1 to B3 designation. The output signals of these load receivers are compared in comparison units BVgl with a maximally permissible rotor blade load profile BLP. With a quite simple rule concept, if for a rotor blade this load profile is exceeded, the output signal of the comparison unit BVgl in the automatic controller Vopt is then processed to the immediate adjustment of the rotor blade concerned by control of the associated control drive V1/2/3. In a refined execution form the adjustment takes place in discrete stages: Underneath a lower limit value given by the load profile no read-reducing adjustment takes place. Above an upper limit value takes place like above mentioned. an immediate adjustment. In the intermediate range a load-sensitive adjustment takes place via the automatic controller Vopt with the goal of reducing the operating loads for the overall system without considerable loss of earnings to a minimum.

[0024] A further improvement of the rule algorithm is obtained, if by use of Fuzzy or adaptive regulation concepts no discrete limit values are given, but sliding transitions between the individual proceedings described above to be created.

[0025] Besides the load measuring signals of the load receivers B1 to B3 of a summation circuit SIGMA B are supplied, and their output signal as a function of the turning position of the rotor in an accounting unit VB charges, in order to determine the effects of the rotor loads on the load receiver KR of the driveshaft. It takes place thus (computational) a transmission of the loads of the rotor blades on the rotor axis (also driving rank called). The rotor axis is optionally with the load receiver KR provided, apart from the loads also different loads which can be attributed to the rotor, e.g. Torsion vibrations, takes up, which are not to be calculated possibly by the rotor blade loads. The optional

reading and/or Acceleration adaptor KR of the driveshaft increases thus the accuracy of the actual loads fed into the automatic controller Vopt.

[0026] The sum of all loads seized by the load receiver KR is compared in a comparator unit RVgl with a given maximum rotor axis load profile. The output signal of this comparison is given to VR, which converts the rotor axis loads into loads affecting the tower on the automatic controller Vopt, and, supplied to an accounting unit beyond that. Loads the affecting the tower, those during optional arrangement of the reading and/or Acceleration adaptor KT over of this instrumentation seized, if necessary not by accounting of the loads determinable from the driveshaft load are supplemental, again with a given maximally permissible tower load profile are not finally compared. The result of this comparison is supplied to the automatic controller VVpt.

[0027] The load profiles BLP, RLP and TLP are not necessarily constant, but can be changed and adapted in particular as a function of the operating condition and/or the actual working time of the WKA and the number and size up to the respective point of period of operation change of load arisen.

[0028] In Fig. an automatic control loop is represented 2, with which by the accounting unit VB, VR will transfer the loads construction unit of the WKA to with this directly coupled construction unit (thus of the rotor on driving rank and of driving rank on the tower) computationally. Compellingly this is necessary however not, since in each construction unit of the WKA load receivers can be present. To that extent could be done without the connection between VB and KR as well as VR and KT. How mentions already above, one could do also without the reading or acceleration adaptor KR and KT of the rotor axis R and the tower T. The loads of the building groups driving rank, car and tower were then determined by accounting, instrumentation seized loads of the affecting the rotor blades.

[0029] Critical loads in all constructional parts are thus avoided by a sequential processing in the automatic control loop. It is favourable to determine the load conditions of all construction units of the WKA at the same time instrumentation or computationally.

[0030] All signals supplied by the comparison units are received into the automatic controller Vopt, where they are converted as a function of rule regulations (either deterministically or not deterministically, digitally or similar, by means of PID, Fuzzy or adaptive rule concepts) into heading for signals for the single control of the turning position of the rotor blades. This processing takes place as a function of the rotor position ϕ and for the individual sheets separately, so that an optimal adjustment is possible. In this way also an accurate adjustment is possible to the local wind field, which reaches the rotor level. By means of not represented memory can be fallen back in each case to load data of the last sheet in the position concerned. This is reached by delay elements, which (according to the current rotation speed) cyclically the data of B1 in the direction of B2 and B3 and B1 to pass on.

[0031] In other words thus the current rotor blade parameters (adjustment angle, wind load) can, which within an angle of rotation of the rotor apply, to into rotor direction of rotation the next, rotor blade driving through the angle range to be transferred. Thereby its twist can if necessarily, faster, because as it were with regard to the future taking place, are made. Thus a still more exact adjustment to the respective wind and thus load conditions is possible.

[0032] Additionally to the pitch angle of the rotor blades the correcting variables supplied by the automatic controller affect a twist of the car (azimuth angle change) and by a change of the generator moment also on the rotor speed; the control drives for this needed and/or. Logic elements are not drawn in in figure 2.

[0033] With the variant of the remark example represented shown in figure 3 in figure 1 it is represented that a rigid two-sheet rotor Z, which is stored in a main warehouse H and can over a

Pendelgelenk P with the measures according to invention be operated surely, if the sheet B1 is operated in such a way in each case by adjusting (preferably by means of an PID automatic controller as a function of the momentary pendulum angle) that the Pendelgelenk P cannot arrive at a notice. Also the load of the main warehouse H can accordingly be limited, so that this can be implemented compared with conventional camps substantially more weakly, since straight striking powers lead as well known to bearing failures, which are avoided with the measures according to invention.

[0034] With the second variant in figure 1 represented remark example, shown in figure 4, a pitch camp N and a greed camp are intended of the G, which likewise kept free by jerky loads and/or. in a given load profile to be driven can.

[0035] The greed camp is usually provided with wind-powered devices with a strong brake, which is dispensable with the plants according to invention, if amplifier express moments the affecting this camp are lowered by the measures according to invention. By a controlling of the turning position of the rotor blades (pitch) as a function of its respective positions within each rotor revolution can be completely done without a car azimuth brake system.

[0036] The possibility is not represented of deducing from the unbalance in the context of the invention of the taking place adjustment (pitch) movements of the sheets a signal in the design which leads perpendicularly to (again) an adjustment of the rotor direction to the wind simply by adjustment of the rotor blades. A middle unbalance of the rotor blade adjustment necessary detected during a certain period (minute range) for the load minimization is not a sign for one parallel to the rotor axis taking place wind idea. For this compensating an asymmetrical load of the rotor is seized during a certain period. Afterwards an adjustment of the car takes place via (overlaid) temporally limited Pitchen, whereby this pitch overlay is temporally so limited that the car moves into a turning position, in which asymmetrical loads in the temporal means is balanced.

[0037] In figures a tabular representation of different parameters and factors of influence of a wind-powered device are described a and 5b, which applies to consider it for the reduction of the effects of load fluctuations on the individual building groups of the wind-powered device.

[0038] The variations in load caused by the wind (dynamic loads) have the following main causes, which can have more or less large influence dependent on the machine dynamics:

A. deterministically:

1. vertical wind gradient (elevator gradient)
2. Oblique incident flow
3. Tower before rope/tower shade

B. stochastically (natural and wind-park-induced three-dimensional turbulence)

1. local Böen
2. turbulence-caused vertical and horizontal wind gradients

[0039] In figures a and 5b becomes, on the basis of the load components, which possibilities for the setting up represented by read-reducing automatic control loops systematically, important for the interpretation of wind-powered devices, which to exist, to minimize over the effects of these variations in load and/or. to absorb.

[0040] In the first column thereby the load components of the direction of the force river crucial for wind-powered devices are following listed. Column 2 indicates the main causes for the existing variations in load. Column 3 is a rough evaluation of the cost relevance of the individual load components. The columns 4 to 6 indicate the initially and initial values for possible automatic control loops for the fulfilment of the task according to invention. Also

EMR12.1

Alternative concept designated column 5 contained here under section 1 mentioned, so far unsuccessful concepts the articulated component interfaces.

[0041] The selected sequence of the load places: Rotor blades, rotor center, tower head corresponds to the quality of the measured information:

[0042] The impact and drag moment as the first example of the rule device (MyB and stand. MzB) in the blade root of the sheets as input signal for the order, can be determined computationally with sufficient accuracy the important following load components. Thus a load minimum for the overall system can be achieved by selective Pitchen (not necessary way cyclically). An additional signal of the tower longitudinal acceleration would increase the accuracy again, because otherwise overall acceptance must be met over (less important) the stagnation pressure the tower wall. With that increasingly used so-called

EMR12.1 soft towers, whose natural frequency is smaller than the rotor turning frequency, permit a more exact analysis of the current tower dynamics to acceleration sensors.

[0043] However only if the tower head loads from the measurement of tower head acceleration are available in a second example, the distribution of the load portions is not accurately assignable on the individual sheets (the tower head loads essentially result from the summation of the sheet loads).

Presumably with this simpler system by selective Pitchen still possible for the example 1 comparable reduction of the tower head loads, the reduction of the dynamic loads will be in the sheets or the deflection of the sheets however will clearly smaller fail than in the first case.

[0044] Those managing in the table of represented connections are strongly simplified and neglect the dead weight of the components as well as influences of subordinated meaning (e.g. Influences of inertias and gyroscope forces and by geometrical couplings such as coning angle, inclination error etc.). In particular it is to be considered that the individual load components cannot be regulated independently e.g. Dependence on flapping moment MyB and drag moment MzB). It is of elementary importance further that the anvisierten automatic control loops may not lead or only insignificantly to the reduction of the achievement yield (torque MzR*Drehzahl). Despite these restrictions it is possible to reduce the critical variations in load with the represented systems strongly. For this it contributes substantially that the largest variations in load develop above the nominal wind velocity and thus within a range, with which the rotor is abgeregelt anyway. The existing power reserves in the rotor can be used thus to load reduction.

[0045] The automatic controller Vopt of the automatic control loop in accordance with figure 2 works thus preferentially after a priority sequence. The priorities e.g. become weighted after the column EMR12.1 effect of costs of the figure ä, whereby as the highest priority the plant integrity is considered. In other words it comes then, if the maximally permissible load profiles for the rotor blade deflection and the bend of tower are reached, in each case to an influencing control on the WKA by a rotor blade adjustment, in order to protect the WKA against damages. This adjustment e.g. takes place, regardless of the energy output, which enjoys quite even a quite high priority, given with this rotor blade pitch angle, but nachranging to the plant integrity is.

[0046] A further improvement of the automatic controller action can be achieved, as Vopt are put to the automatic controller directly information about the lift distribution along the rotor blades as input signal at the disposal. Thus a more exact collection of the transverse forces at the blade root is possible.

Physically this can be realized by a multiplicity of DMS elements along the rotor blades or by pressure measurements on over the sheet length distributed drillings or over piezoelectric pressure-sensitive foils.

[0047] The invention is limited its execution to those managing not indicated preferential remark examples. Rather a number of variants is possible, which from the represented solution with in principle differently constituted remarks use makes.

Claims

1. Wind-powered device with a rotor, which exhibits at least two sheets with adjustable angles of incidence and a receiver, which supplies a measured variable, which forms a measure for the current load of an element of the structure of the plant, whereby the angle of incidence is changeable as a function of the measured variable, one acceleration or deformation of the element represents, which is detectable over an appropriate receiver and a measure for a Kraft or one moment forms, thus characterized,
that the receiver in a rotor blade is intended and/or that the rotor blades are individually adjustable.
2. Wind-powered device according to requirement 1, by it characterized that a rule device is intended, the angle of incidence of the sheet or the sheets changes which in such a manner that the measured variable or in the element an upstream element arising and due to the constructional conditions a figure or a one corrected for the basis of the measured variable from several individual such figures size cumulated on the basis of a in particular changeable value, in particular a temporal average value, not beyond a given measure deviate.
3. Wind-powered device according to requirement 1 or 2, by the fact characterized that it concerns with the elements a rotor blade, the driveshaft, the generator car and/or the tower.
4. Wind-powered device according to requirement 1 or 2, by the fact characterized that the effect of the rule device is dependent of the angle position of the sheet as a function of the rotor position.
5. Wind-powered device according to a preceding requirement, by the fact characterized that during increasing acceleration, increasing moment, increasing Kraft or increasing deformation the aerodynamic angle of incidence is reduced.
6. Wind-powered device after one of the preceding requirements, by the fact characterized that the measured variable the acceleration, which Kraft or Verformung of a sheet or the drive shaft forms.
7. Wind-powered device after one of the preceding requirements, by the fact characterized that at least an additional measured variable is consulted and the two measured variables are processed together.
8. Wind-powered device after one of the preceding requirements, by the fact characterized that during a multi-level processing of the load constructionally building group lain more near to the rotor on the load from it continues to remove convenient building group closed becomes.
9. Wind-powered device after one of the preceding requirements, by the fact characterized that the angle of incidence for individual sheets for different angle positions is selectively variable.
10. Wind-powered device after one of of the preceding requirements, thereby marked that delay or memory means is intended, which acceleration or load signals from a first rotor blade an assigned a processing level to following a rotor blade in the direction of rotation an assigned processing level by a deceleration time it passes on, which corresponds to the length of time, which needs the following rotor

blade at the current rotation speed, in order into the position of the preceding rotor blade to arrive (cyclic selective Pitchen).

11. Wind-powered device after one of the preceding requirements, by the fact characterized that means are intended, in order to prevent by selective adjustment of the rotor blades an excessive decaying of a pendulum hub or a pitch joint.

12. Wind-powered device after one of the preceding requirements, by the fact characterized that by selective adjustment of individual rotor blades a yawing movement of the rotor axis is limited.

13. Wind-powered device according to requirement 12, by the fact characterized that by a balancing of selective adjusting of the rotor blades necessary for the Kraftausgleich on following building groups via active adjustment of the rotor blades a twist of the car is made around one perpendicularly to the rotor axis arranged axle and thus an adjustment of the rotor axis perpendicularly to the wind.

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets

(11)



EP 0 995 904 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
26.04.2000 Patentblatt 2000/17

(51) Int. Cl.⁷: F03D 7/02

(21) Anmeldenummer: 99120771.3

(22) Anmelddatum: 20.10.1999

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(30) Priorität: 20.10.1998 DE 19849365

(71) Anmelder: Tacke Windenergie GmbH
48499 Salzbergen (DE)

(72) Erfinder: Weitkamp, Roland
49080 Osnabrück (DE)

(74) Vertreter:
Hilleringmann, Jochen, Dipl.-Ing. et al
Patentanwälte
von Kreisler-Selting-Werner,
Bahnhofsvorplatz 1 (Deichmannhaus)
50667 Köln (DE)

(54) Windkraftanlage

(57) Windkraftanlage mit einem Rotor, der mindestens zwei Blätter mit verstellbaren Anstellwinkeln aufweist und einem Aufnehmer, welcher eine Messgröße liefert, die ein Maß für die aktuelle Belastung eines Elements der Struktur der Anlage bildet, wobei der Anstellwinkel in Abhängigkeit von der Messgröße verändert wird, die eine Beschleunigung oder Verformung des Bauelements repräsentiert, die über einen entsprechenden Aufnehmer erfasst wird und ein Maß für eine Kraft oder ein Moment bildet, wobei der Aufnehmer in einem Rotorblatt vorgesehen ist und/oder die Rotorblätter einzeln verstellbar sind.

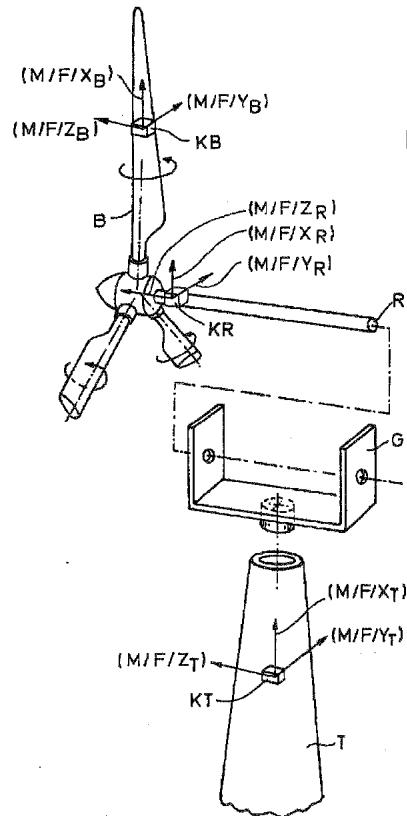


FIG.1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Windkraftanlage gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Bei großen Windkraftanlagen (WKA) werden die maschinenbaulichen Komponenten nicht nach den durch den Wind erzeugten mittleren Lasten dimensioniert, sondern fast ausschließlich durch die aus der ständigen Schwankungen der Windlast hervorgerufenen Lastschwingweiten und Lastspitzen (Extremlasten).

[0003] In der Vergangenheit sind vielfach Versuche unternommen worden, die Belastungsschwankungen mittels Gelenken an den lastübertragenden Komponentenschnittstellen zu reduzieren. Beispiele hierfür sind die in der Hubschraubertechnik üblichen Schlag- und Schwenkgelenke oder die Einführung der Pendelnabe für Zweiblattrotoren.

[0004] Eine weitere Variante wurde mit einer britischen Versuchsanlage realisiert, bei der die Gelenke vom drehenden System in das stehende System verlagert wurden (s. Fig 4). Dort sind dann zwei senkrecht aufeinander stehende Gelenke Gier- und Nicklager erforderlich, die die gesamte Maschinengondel elastisch lagern. All diese Konzepte sind bislang daran gescheitert, dass die Gelenke bei böigem Wind häufig in die aus geometrischen Gründen erforderlichen Anschläge schlagen.

[0005] Ein anderer Ansatz zur Reduzierung der dynamischen Lastanteile ist die beispielsweise aus der Antriebstechnik bekannte aktive Dämpfung von Triebstrangschwingungen durch einen abgestimmten Regelkreis. Bei drehzahlvariablen WKA ist dieses bereits realisiert.

[0006] Weiterhin ist es aus der deutschen Offenlegungsschrift DE 33 08 566 A1 bekannt, auf dem Turm einer Windkraftanlage einen Beschleunigungsmesser vorzusehen, welcher über ein Blatteinstellreferenzsignal eine Verstellung der Rotorblätter und damit eine aerodynamischer Dämpfung des Turms erzeugt.

[0007] Selektives Pitchen der Rotorblätter zwecks Reduktion von Gier- oder Nickmomenten bei Windkraftanlagen ist aus DE-U-297 15 248, DE-U-297 15 249, DE-A-197 39 162 und DE-A-197 39 164 bekannt, die sämtlich nicht zum Stand der Technik nach Artikel 54(3) EPÜ zählen.

[0008] Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein System zur Reduktion der im Betrieb auftretenden Lastschwankungen zu entwickeln, welches einerseits feinfühliger und andererseits selektiver bei örtlichen Windböen arbeitet.

[0009] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass der Aufnehmer in einem Rotorblatt vorgesehen ist bzw. dadurch, dass die Rotorblätter einzeln verstellbar sind.

[0010] Wenn mindestens ein Aufnehmer unmittelbar im Rotorblatt vorgesehen ist, werden Belastungsschwankungen erkannt und können ausgeregelt

werden, bevor sie die übrige Konstruktion erreichen. Die Auswirkungen auf die Konstruktion können aufgrund von gemessenen oder Erfahrungs-Werten vorausberechnet und die Blattanstellwinkel so begrenzt werden, dass vorgegebene Belastungen nicht überschritten werden. Andererseits wird dabei ein Blattanstellwinkel eingehalten, welcher ausreichend ist, um den Leistungsbedarf des Generators zu decken. Die vorgestellte Lösung dient also in erster Linie dazu, dynamische Spitzenbelastungen von Bauelementen zu senken, ohne die Leistungsausbeute der Anlage wesentlich herabzusetzen.

[0011] Durch selektive Einzelverstellung der Rotorblätter in Abhängigkeit von deren Winkelposition können die Kraftwirkungen auf die nachgeordneten Anlagenteile richtungsabhängig bestimmt werden, so dass die Belastungen um einzelne räumliche Achsen selektiv kontrolliert werden können.

[0012] Dabei ist ersichtlicherweise nicht die Herabsetzung der Torsion der Antriebswelle des Generators das Ziel, sondern die dynamische Verringerung der Maximalbelastungen der konstruktiven Bauelemente, welche die Reaktionskräfte der auf den Rotor einwirkenden Windkräfte aufnehmen. Hierbei ist zu beachten, dass die Belastungen der konstruktiven Elemente insgesamt zu betrachten ist, d.h. die Entlastung eines Bauelements kann die Belastung eines anderen bedeuten. Die Lastbegrenzung durch selektive Verstellung der Blätter ist daher so zu wählen, dass die maximale Lastbegrenzung für jedes der Bauelemente eingehalten wird. Es ist also eine Gewichtung günstig, welche eine "programmierte" selektive Verstellung der Blätter in der Weise steuert, dass die Spitzenlasten für die konstruktiven Bauelemente insgesamt herabgesetzt sind.

[0013] Damit kann die konstruktive Auslegung insgesamt so erfolgen, dass durch Begrenzung der Spitzenbelastungen die mittleren Belastungen bei Anlagen insgesamt höher sind, so dass bei gleicher konstruktiver Auslegung höhere Energieerträge möglich sind, oder, alternativ, bei gleichem Energieertrag eine wirtschaftlichere Bauweise realisiert werden kann.

[0014] Bei einer bevorzugten Weiterbildung der erfindungsgemäßen Windkraftanlage ist eine Regelvorrichtung vorgesehen, welche den Anstellwinkel des Blattes oder der Blätter derart verändert, dass die Messgröße oder eine in einem dem Bauelement vorgeschalteten Bauelement auftretende und aufgrund der konstruktiven Gegebenheiten auf der Basis der Messgröße korrigierte Rechengröße oder eine aus mehreren einzelnen derartigen Rechengrößen kumulierte Größe von einem vorgegebenen Wert, insbesondere zeitlichen Mittelwert, nicht über ein vorgegebenes Maß hinaus abweicht.

[0015] Bei den genannten Bauelementen handelt es sich insbesondere um ein Rotorblatt, die Rotorwelle, die Generatorgondel und/oder den Turm und dessen Fundament (bei On-Shore-Anlagen) bzw. Gründung (bei Off-Shore-Anlagen).

[0016] Bei einer vorteilhaften Weiterbildung ist insbesondere die Wirkung der Regelvorrichtung abhängig von der Winkelposition des Blattes in Abhängigkeit von der Rotorstellung.

[0017] Konkret umgesetzt wird dies durch eine Regelvorrichtung, welche online im Anlagenbetrieb aufgrund von messbaren Größen die dynamischen Anlagenbelastungen mit den vorhandenen Regelparametern ausregelt oder zumindest erheblich herabsetzt. Infrage kommende Regelparameter sind im wesentlichen die Blattwinkel der einzelnen Blätter (kollektives und selektives Pitchen), die Rotordrehzahl, das Generatormoment (bei drehzahlvariablen Generatorsystemen) und der Azimutwinkel (Windnachführwinkel).

[0018] Mit dieser Regelvorrichtung ist es bevorzugt auch möglich, die weiter oben geschilderten Ansätze der gelenkigen Lagerung umzusetzen, wenn die Bewegung im Gelenk und deren zeitliche Ableitungen als Eingangsgrößen für die Regelvorrichtung genutzt werden. Besonders günstig ist hier die Variante des freien Gier- oder Azimutlagers (free yaw genannt), da dort keine Anschläge erforderlich sind, um den Drehwinkel zu begrenzen. Dieses System hat den zusätzlichen Vorteil, dass das bei Lufläufern (Rotor auf der windzugewandten Seite des Turms) erforderliche Azimutsystem zur Windnachführung weitgehend entfallen kann, die Nachführung wird aerodynamisch durch selektives Pitchen realisiert.

[0019] Andere vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben bzw. werden nachstehend zusammen mit der Beschreibung der bevorzugten Ausführung der Erfindung anhand der Figuren näher dargestellt. Es zeigen:

Figur 1 als bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung einen Windkraftgenerator mit Kraft- bzw. Momentaufnehmern an verschiedenen Baugruppen.

Figur 2 ein schematisches Blockschaltbild des in Figur 1 dargestellten Ausführungsbeispiels,

Figur 3 eine erste Variante des in Figur 1 dargestellten Ausführungsbeispiels,

Figur 4 eine zweite Variante des in Figur 1 dargestellten Ausführungsbeispiels sowie

Figuren 5A und 5B eine tabellarische Aufstellung der dynamischen Belastungskomponenten, ihrer Ursachen, des Kosteneinflusses sowie ihrer Mess- und Stellgrößen.

[0020] Bei dem in Figur 1 dargestellten Ausführungsbeispiel eines Windkraftgenerators mit Kraft- bzw. Momentaufnehmern KB, KR, KT an verschiedenen Baugruppen sind die Momenten- (M) bzw. Kraft- (F) Koordinaten-Richtungen x,y,z der Komponenten Blatt B,

Rotorachse R in der Gondel G und Turm T dargestellt. Am Fußpunkt der Koordinatensysteme befinden sich Messwertaufnehmer für lokale, in den Bauelementen anstehende Kräfte oder Momente, welche die aktuelle Belastung repräsentieren und beispielsweise in Form von Dehnungsmessstreifen vorgesehen sind. Anstelle der Kraft- oder Momentenaufnehmer können auch Beschleunigungssensoren vorgesehen sein, welche bereits die Bewegungen aufnehmen (nach zweimaliger Integration des Messwerts), die zu dem Lastzustand führen. Bei einem Rotorblatt wirken Lasten durch Böen zu einer Beschleunigung in Richtung $-z_B$, und damit auch zu einer Verformung in $-z$ -Richtung.

[0021] Das Getriebe und der elektrische Generator sind in Figur 1 aus Gründen der Übersichtlichkeit fortgelassen worden. Entsprechendes gilt für die Verstellantriebe der Rotorblätter.

[0022] Die Auswirkungen der verschiedenen über die Messwertaufnehmer ermittelten Größen sind weiter unten in Figur 5 dargestellt.

[0023] Bei dem in Figur 2 dargestellten schematischen Blockschaltbild eines Regelkreises für das Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 sind die drei jeweils mit Last- bzw. Beschleunigungsaufnehmern KB bestückten Rotorblätter mit B_1 bis B_3 bezeichnet. Die Ausgangssignale dieser Lastaufnehmer werden in Vergleichseinheiten B_{Vgl} mit einem maximal zulässigen Rotorblatt-Lastprofil B_{LP} verglichen. Bei einem recht einfachen Regelkonzept wird dann, wenn für ein Rotorblatt dieses Lastprofil überschritten wird, das Ausgangssignal der Vergleichseinheit B_{Vgl} in dem Regler V_{opt} zur sofortigen Verstellung des betreffenden Rotorblatts durch Ansteuerung des zugehörigen Stellantriebs $V_{1/2/3}$ verarbeitet. In einer verfeinerten Ausführungsform erfolgt die Verstellung in diskreten Stufen: Unterhalb eines durch das Lastprofil vorgegebenen unteren Grenzwertes erfolgt keinerlei lastreduzierende Verstellung. Oberhalb eines oberen Grenzwertes erfolgt wie o.g. eine sofortige Verstellung. In dem Zwischenbereich erfolgt eine lastabhängige Verstellung durch den Regler V_{opt} mit dem Ziel, die Betriebsbelastungen für das Gesamtsystem ohne nennenswerten Ertragsverlust auf ein Minimum zu reduzieren.

[0024] Eine weitere Verbesserung des Regelalgorithmus wird erzielt, wenn durch Verwendung von Fuzzy- oder adaptiver Regelungskonzepte keine diskreten Grenzwerte vorgegeben werden, sondern gleitende Übergänge zwischen den einzelnen oben beschriebenen Vorgehensweisen geschaffen werden.

[0025] Zudem werden die Belastungs-Messsignale der Lastaufnehmer B_1 bis B_3 einer Summationsschaltung Σ_B zugeführt, und deren Ausgangssignal in Abhängigkeit von der Drehstellung des Rotors in einer Verrechnungseinheit V_B verrechnet, um die Auswirkungen der Rotorbelastungen auf den Lastaufnehmer KR der Rotorwelle zu ermitteln. Es erfolgt also eine (rechnerische) Übertragung der Belastungen der Rotorblätter auf die Rotorachse (auch Triebstrang genannt). Die

Rotorachse selbst ist optional mit dem Lastaufnehmer KR versehen, der neben den auf den Rotor zurückzuführenden Belastungen auch andere Belastungen, z.B. Torsionsschwingungen, aufnimmt, die möglicherweise nicht aus den Rotorblattbelastungen zu errechnen sind. Der optionale Last- bzw. Beschleunigungsaufnehmer KR der Rotorwelle erhöht also die Genauigkeit der in den Regler V_{opt} eingespeisten Ist-Belastungen.

[0026] Die Summe sämtlicher vom Lastaufnehmer KR erfasster Belastungen wird in einer Vergleichseinheit R_{Vgl} mit einem vorgegebenen maximalen Rotorachsen-Belastungsprofil verglichen. Das Ausgangssignal dieses Vergleichs wird auf den Regler V_{opt} gegeben, und darüber hinaus einer Verrechnungseinheit V_R zugeführt, die die Rotorachsenbelastungen in sich auf den Turm auswirkende Belastungen umrechnet. Die sich auf den Turm auswirkenden Belastungen, die bei optionaler Anordnung des Last- bzw. Beschleunigungsaufnehmers KT um von diesem messtechnisch erfassbar gegebenenfalls nicht durch Verrechnung der sich aus der Rotorwellenbelastung ermittelbaren Belastungen ergänzt sind, werden schließlich wieder mit einem vorgegebenen maximal zulässigen Turm-Belastungsprofil verglichen. Das Ergebnis dieses Vergleichs wird dem Regler V_{opt} zugeführt.

[0027] Die Belastungsprofile B_{LP} , R_{LP} und T_{LP} sind nicht notwendigerweise konstant, sondern können insbesondere in Abhängigkeit von dem Betriebszustand und/oder der Betriebsdauer der WKA und der Anzahl und Größe an bis zum jeweiligen Betriebszeitpunkt aufgetretenen Lastwechseln verändert und angepasst werden.

[0028] In Fig. 2 ist ein Regelkreis dargestellt, bei dem durch die Verrechnungseinheit V_B , V_R die Belastungen der einen Baueinheit der WKA auf die mit dieser unmittelbar gekoppelten Baueinheit (also vom Rotor auf den Triebstrang und vom Triebstrang auf den Turm) rechnerisch übertragen werden. Zwingend erforderlich ist dies jedoch nicht, da in jeder Baueinheit der WKA Lastaufnehmer vorhanden sein können. Insoweit könnte auf die Verbindung zwischen V_B und KR sowie V_R und KT verzichtet werden. Wie bereits oben erwähnt, könnte man auch auf die Last- oder Beschleunigungsaufnehmer KR und KT der Rotorachse R und des Turms T verzichten. Die Belastungen der Baugruppen Triebstrang, Gondel und Turm würden dann durch Verrechnung der auf die Rotorblätter wirkenden, messtechnisch erfassten Belastungen ermittelt.

[0029] Durch eine sequentielle Verarbeitung im Regelkreis werden also Grenzbelastungen in allen konstruktiven Teilen vermieden. Vorteilhaft ist es, die Belastungszustände sämtlicher Baueinheiten der WKA gleichzeitig messtechnisch oder rechnerisch zu ermitteln.

[0030] Sämtliche von den Vergleichseinheiten gelieferten Signale gehen in den Regler V_{opt} ein, wo sie in Abhängigkeit von Regelvorschriften (entweder deterministisch oder nicht deterministisch, digital oder ana-

log, mittels PID-, Fuzzy- oder adaptiver Regelkonzepte) in Ansteuersignale zur Einzelansteuerung der Drehstellung der Rotorblätter umgesetzt werden. Diese Verarbeitung erfolgt in Abhängigkeit von der Rotorstellung φ und für die einzelnen Blätter getrennt, so dass eine optimale Anpassung möglich ist. Auf diese Weise ist auch eine exakte Anpassung an das lokale Windfeld möglich, welches die Rotorebene erreicht. Mittels nicht dargestellter Speicher kann jeweils auf Belastungsdaten des letzten Blattes in der betreffenden Position zurückgegriffen werden. Dies wird durch Verzögerungselemente erreicht, welche (entsprechend der aktuellen Rotationsgeschwindigkeit) zyklisch die Daten von B1 in Richtung auf B2 und B3 und wieder an B1 weitergeben.

[0031] Mit anderen Worten können also die aktuellen Rotorblattparameter (Einstellwinkel, Windbelastung), die innerhalb eines Drehwinkelbereichs des Rotors gelten, auf das in Rotordrehrichtung nächstfolgende, den Winkelbereich durchfahrende Rotorblatt übertragen werden. Damit kann dessen Verdrehung, sofern erforderlich, schneller, weil sozusagen vorausschauend erfolgend, vorgenommen werden. Somit ist eine noch genauere Anpassung an die jeweiligen Wind- und damit Belastungsverhältnisse möglich.

[0032] Zusätzlich zum Pitchwinkel der Rotorblätter wirken sich die vom Regler gelieferten Stellgrößen auf eine Verdrehung der Gondel (Azimut-Winkelveränderung) und durch eine Veränderung des Generatormoments auch auf die Rotordrehzahl aus; die hierfür benötigten Stellantriebe bzw. Schaltelemente sind in Figur 2 nicht eingezzeichnet.

[0033] Bei der in Figur 3 gezeigten Variante des in Figur 1 dargestellten Ausführungsbeispiels ist dargestellt, dass ein starrer Zweiblattrotor Z, der in einem Hauptlager H gelagert ist und über ein Pendelgelenk P mit den erfindungsgemäßen Maßnahmen sicher betrieben werden kann, wenn das Blatt B1 durch Verstellen (vorzugsweise mittels eines PID-Reglers in Abhängigkeit von dem momentanen Pendelwinkel) jeweils so betrieben wird, dass das Pendelgelenk P nicht zu einem Anschlag gelangen kann. Entsprechend lässt sich auch die Belastung des Hauptlagers H begrenzen, so dass dieses im Vergleich zu herkömmlichen Lagern wesentlich schwächer ausgeführt werden kann, da bekanntlich gerade Stoßkräfte zu Lagerschäden führen, welche mit den erfindungsgemäßen Maßnahmen vermieden sind.

[0034] Bei der in Figur 4 gezeigten zweiten Variante des in Figur 1 dargestellten Ausführungsbeispiel sind ein Nicklager N und ein Gierlager G vorgesehen, welche ebenfalls von stoßartigen Belastungen freigehalten bzw. in einem vorgegebenen Lastprofil gefahren werden können.

[0035] Das Gierlager ist üblicherweise bei Windkraftanlagen mit einer starken Bremse versehen, welche bei den erfindungsgemäßen Anlagen entbehrlich ist, wenn die auf dieses Lager wirkenden Versteilmomente durch die erfindungsgemäßen Maßnahmen herabgesetzt werden. Durch eine Steuerung der

Drehstellung der Rotorblätter (Pitch) in Abhängigkeit von ihren jeweiligen Positionen innerhalb jeder Rotorumdrehung kann gänzlich auf ein Gondel-Azimut-Bremssystem verzichtet werden.

[0036] Nicht dargestellt ist in der Zeichnung die Möglichkeit, aus der Unsymmetrie der im Rahmen der Erfindung erfolgenden Verstell-(Pitch-)Bewegungen der Blätter ein Signal herzuleiten, welches zu einer (Wieder-)Ausrichtung der Rotorrichtung senkrecht zum Wind einzig und allein durch Verstellung der Rotorblätter führt. Eine über einen gewissen Zeitraum (Minutenbereich) detektierte mittlere Unsymmetrie der zur Belastungsminimierung notwendigen Rotorblattverstellung ist nämlich ein Anzeichen für einen nicht parallel zur Rotorachse erfolgenden Windeinfall. Hierzu wird die Ausregelung einer unsymmetrischen Belastung des Rotors über einen gewissen Zeitraum erfasst. Danach erfolgt eine Verstellung der Gondel durch (überlagertes) zeitlich begrenztes Pitchen, wobei diese Pitch-Überlagerung zeitlich so bemessen ist, dass sich die Gondel in eine Drehposition bewegt, in der unsymmetrische Belastungen im zeitlichen Mittel ausgeglichen sind.

[0037] In Figuren 5A und 5B ist eine tabellarische Darstellung verschiedener Parameter und Einflussfaktoren einer Windkraftanlage beschrieben, die es zur Reduktion der Auswirkungen von Belastungsschwankungen auf die einzelnen Baugruppen der Windkraftanlage zu berücksichtigen gilt.

[0038] Die durch den Wind hervorgerufenen Lastschwankungen (dynamische Lasten) haben folgende Hauptursachen, die abhängig von der Maschinendynamik mehr oder weniger großen Einfluss haben können:

A. deterministisch:

1. vertikaler Windgradient (Höhengradient)
2. Schräganströmung
3. Turmvorstau / Turmschatten

B. stochastisch (natürliche und windparkinduzierte dreidimensionale Turbulenz)

1. lokale Böen
2. turbulenzbedingte vertikale und horizontale Windgradienten

[0039] In Figuren 5A und 5B werden, ausgehend von den für die Auslegung von Windkraftanlagen wichtigen Lastkomponenten, die Möglichkeiten zum Aufbau von lastreduzierenden Regelkreisen systematisch dargestellt, welche bestehen, um die Auswirkungen dieser Lastschwankungen zu minimieren bzw. zu dämpfen.

[0040] In der ersten Spalte sind dabei die für Windkraftanlagen entscheidenden Lastkomponenten der Richtung des Kraftflusses folgend aufgelistet. Spalte 2

gibt die Hauptursachen für die vorhandenen Lastschwankungen an. Spalte 3 ist eine grobe Bewertung der Kostenrelevanz der einzelnen Lastkomponenten. Die Spalten 4 bis 6 geben die Eingangs- und Ausgangsgrößen für mögliche Regelkreise zur Erfüllung der erfundungsgemäßen Aufgabe an. Die mit „Alternativkonzept“ bezeichnete Spalte 5 beinhaltet hierbei die unter Abschnitt 1 erwähnten, bislang erfolglosen Konzepte gelenkiger Komponentenschnittstellen.

[0041] Die gewählte Reihenfolge der Lastorte: Rotorblätter, Rotorzentrum, Turmkopf entspricht der Qualität der gemessenen Information:

[0042] Steht als erstes Beispiel der Regelvorrichtung das Schlag- und Schwenkmoment (M_{yB} u. M_{zB}) in der Blattwurzel der Blätter als Eingangssignal zur Verfügung, können rechnerisch mit ausreichender Genauigkeit die wichtigen nachfolgenden Lastkomponenten ermittelt werden. Somit kann durch selektives Pitchen (nicht notwendiger Weise zyklisch) ein Lastminimum für das Gesamtsystem erreicht werden. Ein zusätzliches Signal der Turmlängsbeschleunigung würde die Genauigkeit nochmals erhöhen, weil sonst pauschale Annahmen über den (minder wichtigen) Staudruck auf die Turmwandung getroffen werden müssen. Bei den zunehmend eingesetzten sogenannten „weichen“ Türmen, deren Eigenfrequenz kleiner ist als die Rotordrehfrequenz, erlauben Beschleunigungssensoren eine genauere Analyse der aktuellen Turmdynamik.

[0043] Stehen in einem zweiten Beispiel hingegen nur die Turmkopflasten aus der Messung der Turmkopfbeschleunigung zur Verfügung, ist die Verteilung der Lastanteile auf die einzelnen Blätter nicht exakt bestimmbar (die Turmkopflasten ergeben sich im wesentlichen aus der Summation der Blattlasten). Eine dem Beispiel 1 etwa vergleichbare Reduzierung der Turmkopflasten wird voraussichtlich mit diesem einfacheren System durch selektives Pitchen noch möglich sein, die Reduzierung der dynamischen Lasten in den Blättern oder der Durchbiegung der Blätter wird aber deutlich geringer ausfallen als im ersten Fall.

[0044] Die vorstehend in der Tabelle dargestellten Zusammenhänge sind stark vereinfacht und vernachlässigen das Eigengewicht der Komponenten sowie Einflüsse untergeordneter Bedeutung (z.B. Einflüsse von Trägheits- und Kreiselkräften und durch geometrische Kopplungen wie Konuswinkel, Achsneigung usw.). Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen Lastkomponenten nicht unabhängig voneinander geregelt werden können z.B. Abhängigkeit von Schlagmoment M_{yB} und Schwenkmoment M_{zB}). Von elementarer Wichtigkeit ist weiterhin, dass die anvisierten Regelkreise nicht oder nur unwesentlich zur Reduzierung der Leistungsausbeute (Drehmoment $M_{zR} \cdot Drehzahl$) führen dürfen. Trotz dieser Einschränkungen ist es möglich, die kritischen Lastschwankungen mit den dargestellten Systemen stark zu reduzieren. Hierzu trägt wesentlich bei, dass die größten Lastschwankungen oberhalb der Nennwindge-

schwindigkeit entstehen und somit in einem Bereich, bei dem der Rotor ohnehin abgeregelt wird. Die vorhandenen Leistungsreserven im Rotor können somit zu Lastreduzierung genutzt werden.

[0045] Der Regler V_{opt} des Regelkreises gemäß Figur 2 arbeitet also bevorzugt nach einer Prioritätenreihenfolge. Die Prioritäten werden z.B. gewichtet nach der Spalte „Kosteneinfluss“ der Figur 5A, wobei als oberste Priorität die Anlagenintegrität gilt. Mit anderen Worten kommt es dann, wenn die maximal zulässigen Belastungsprofile für die Rotorblattdurchbiegung und die Turmbiegung erreicht sind, in jedem Fall zu einer Einflussnahme auf die WKA durch eine Rotorblattverstellung, um die WKA vor Beschädigungen zu schützen. Diese Verstellung erfolgt z.B. ungeachtet der bei diesem Rotorblatt-Pitchwinkel gegebenen Energieausbeute, die durchaus selbst eine recht hohe Priorität genießt, aber nachranging zur Anlagenintegrität ist.

[0046] Eine weitere Verbesserung des Regelverhaltens kann erreicht werden, indem dem Regler V_{opt} direkt Informationen über die Auftriebsverteilung entlang der Rotorblätter als Eingangssignal zur Verfügung gestellt werden. Damit nämlich ist eine genauere Erfassung der Querkräfte an der Blattwurzel möglich. Physikalisch kann dies durch eine Vielzahl von DMS-Elementen entlang der Rotorblätter oder durch Druckmessungen an über die Blatlänge verteilten Bohrungen oder über piezoelektrische druckempfindliche Folien realisiert werden.

[0047] Die Erfindung beschränkt sich in ihrer Ausführung nicht auf die vorstehend angegebenen bevorzugten Ausführungsbeispiele. Vielmehr ist eine Anzahl von Varianten möglich, welche von der dargestellten Lösung auch bei grundsätzlich anders gearteten Ausführungen Gebrauch macht.

Patentansprüche

schwindigkeit entstehen und somit in einem Bereich, bei dem der Rotor ohnehin abgeregelt wird. Die vorhandenen Leistungsreserven im Rotor können somit zu Lastreduzierung genutzt werden.	gröÙe oder eine in einem dem Bauelement vorgeschalteten Bauelement auftretende und aufgrund der konstruktiven Gegebenheiten auf der Basis der Messgröße korrigierte Rechengröße oder eine aus mehreren einzelnen derartigen RechengröÙen kumulierte Größe ausgehend von einem insbesondere veränderbaren Wert, insbesondere einem zeitlichen Mittelwert, nicht über ein vorgegebenes MaÙ hinaus abweicht.
[0045] Der Regler V_{opt} des Regelkreises gemäß Figur 2 arbeitet also bevorzugt nach einer Prioritätenreihenfolge. Die Prioritäten werden z.B. gewichtet nach der Spalte „Kosteneinfluss“ der Figur 5A, wobei als oberste Priorität die Anlagenintegrität gilt. Mit anderen Worten kommt es dann, wenn die maximal zulässigen Belastungsprofile für die Rotorblattdurchbiegung und die Turmbiegung erreicht sind, in jedem Fall zu einer Einflussnahme auf die WKA durch eine Rotorblattverstellung, um die WKA vor Beschädigungen zu schützen. Diese Verstellung erfolgt z.B. ungetacht der bei diesem Rotorblatt-Pitchwinkel gegebenen Energieausbeute, die durchaus selbst eine recht hohe Priorität genießt, aber nachrangig zur Anlagenintegrität ist.	5 3. Windkraftanlage nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei den Bauelementen um ein Rotorblatt, die Rotorwelle, die Generatorgondel und/oder den Turm handelt.
[0046] Eine weitere Verbesserung des Regelverhaltens kann erreicht werden, indem dem Regler V_{opt} direkt Informationen über die Auftriebsverteilung entlang der Rotorblätter als Eingangssignal zur Verfügung gestellt werden. Damit nämlich ist eine genauere Erfassung der Querkräfte an der Blattwurzel möglich. Physikalisch kann dies durch eine Vielzahl von DMS-Elementen entlang der Rotorblätter oder durch Druckmessungen an über die Blattlänge verteilten Bohrungen oder über piezoelektrische druckempfindliche Folien realisiert werden.	10 4. Windkraftanlage nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Wirkung der Regelvorrichtung abhängig ist von der Winkelposition des Blattes in Abhängigkeit von der Rotorstellung.
[0047] Die Erfindung beschränkt sich in ihrer Ausführung nicht auf die vorstehend angegebenen bevorzugten Ausführungsbeispiele. Vielmehr ist eine Anzahl von Varianten möglich, welche von der dargestellten Lösung auch bei grundsätzlich anders gearteten Ausführungen Gebrauch macht.	15 5. Windkraftanlage nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass bei zunehmender Beschleunigung, zunehmendem Moment, zunehmender Kraft oder zunehmender Verformung der aerodynamische Anstellwinkel verringert wird.
Patentansprüche	20 6. Windkraftanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Messgröße die Beschleunigung, die Kraft oder Verformung eines Blattes oder der Antriebswelle bildet.
1. Windkraftanlage mit einem Rotor, der mindestens zwei Blätter mit verstellbaren Anstellwinkeln aufweist und einem Aufnehmer, welcher eine Messgröße liefert, die ein MaÙ für die aktuelle Belastung eines Elements der Struktur der Anlage bildet, wobei der Anstellwinkel in Abhängigkeit von der Messgröße veränderbar ist, die eine Beschleunigung oder Verformung des Bauelements repräsentiert, welche über einen entsprechenden Aufnehmer erfassbar ist und ein MaÙ für eine Kraft oder ein Moment bildet,	25 7. Windkraftanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine zusätzliche Messgröße herangezogen wird und die beiden MessgröÙen gemeinsam weiterverarbeitet werden.
dadurch gekennzeichnet, dass der Aufnehmer in einem Rotorblatt vorgesehen ist und/oder dass die Rotorblätter einzeln verstellbar sind.	30 8. Windkraftanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei einer mehrstufigen Verarbeitung von der Belastung einer konstruktiv dem Rotor näher gelegenen Baugruppe auf die Belastung einer weiter davon entfernt gelegenen Baugruppe geschlossen wird.
2. Windkraftanlage nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine Regelvorrichtung vorgesehen ist, welche den Anstellwinkel des Blattes oder der Blätter derart verändert, dass die Mess-	35 9. Windkraftanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Anstellwinkel für einzelne Blätter für verschiedene Winkelstellungen selektiv veränderlich ist.
gröÙe oder eine in einem dem Bauelement vorgeschalteten Bauelement auftretende und aufgrund der konstruktiven Gegebenheiten auf der Basis der Messgröße korrigierte Rechengröße oder eine aus mehreren einzelnen derartigen RechengröÙen kumulierte Größe ausgehend von einem insbesondere veränderbaren Wert, insbesondere einem zeitlichen Mittelwert, nicht über ein vorgegebenes MaÙ hinaus abweicht.	40 10. Windkraftanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Verzögerungs- oder Speichermittel vorgesehen sind, welche Beschleunigungs- oder Lastsignale von einer einem ersten Rotorblatt zugeordneten Verarbeitungsstufe zu einer einem in der Drehrichtung folgenden Rotorblatt zugeordneten Verarbeitungsstufe mit einer Verzögerungszeit weiterleiten, wel-

che der Zeitdauer entspricht, welches das folgende Rotorblatt bei der aktuellen Rotationsgeschwindigkeit benötigt, um in die Position des vorangehenden Rotorblattes zu gelangen (zyklisches selektives Pitchen). 5

11. Windkraftanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Mittel vorgesehen sind, um durch selektive Verstellung der Rotorblätter ein übermäßiges Ausschwingen einer Pendelnabe oder eines Nickgelenks zu verhindern.
12. Windkraftanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass durch selektive Verstellung einzelner Rotorblätter eine Gierbewegung der Rotorachse begrenzt wird.
13. Windkraftanlage nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass über eine Symmetrierung des zum Kraftausgleich auf nachfolgende Baugruppen erforderlichen selektiven Verstellens der Rotorblätter durch aktive Verstellung der Rotorblätter eine Verdrehung der Gondel um eine senkrecht zur Rotorachse gerichtete Achse und damit eine Ausrichtung der Rotorachse senkrecht zum Wind erfolgt.

20

25

30

35

40

45

50

55

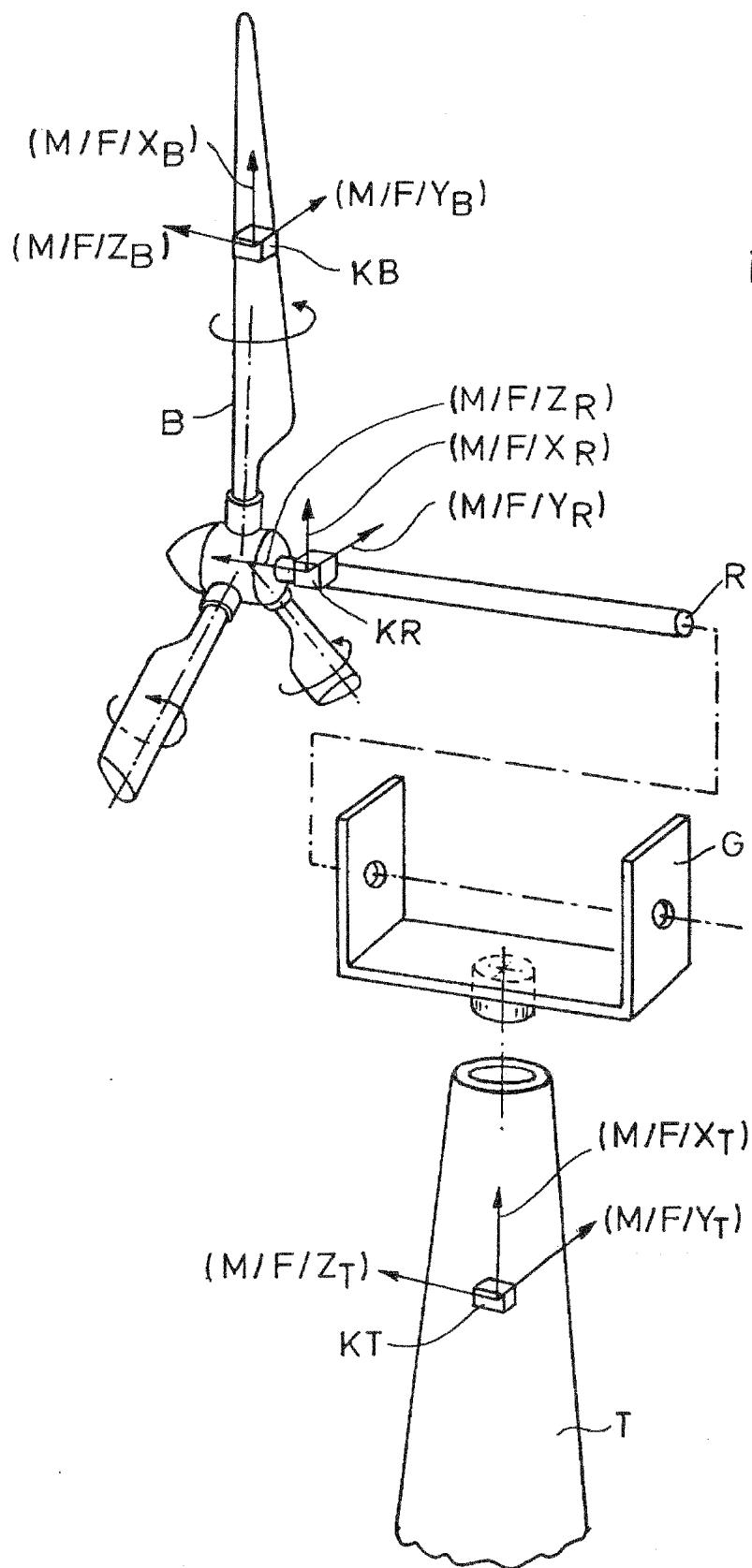
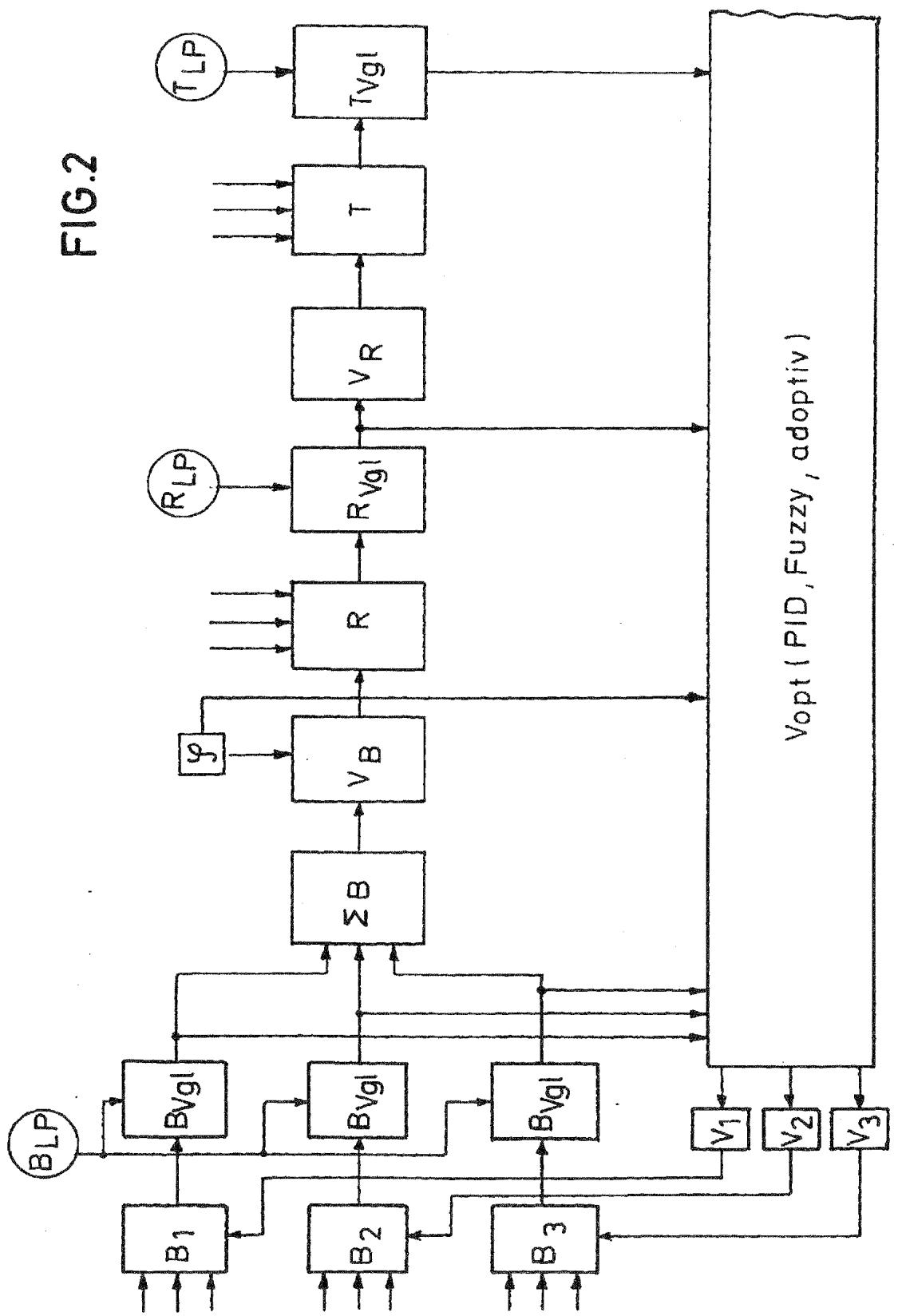
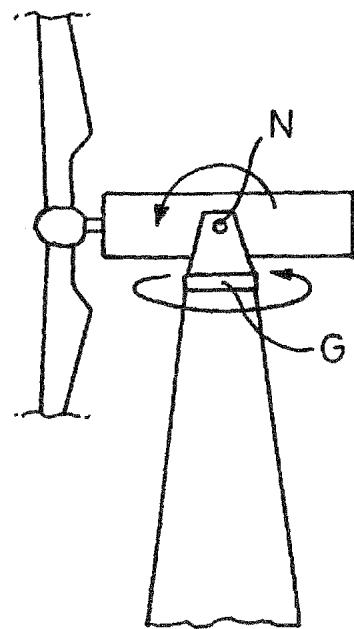
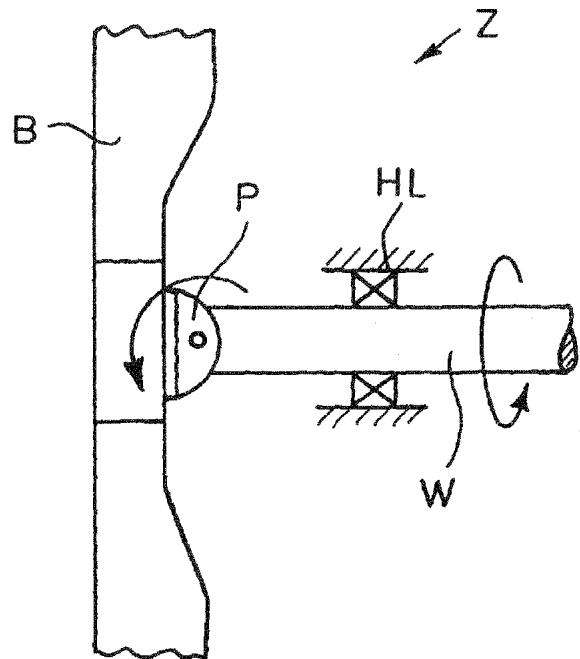


FIG.1

FIG.2





Dyn. Lastkomponente *1)	Ursache (dem Kraftfluss folgend)	Kosteneinfluss u. Komponente *2)	Maßgröße
Rotorblätter (i=1 bis N) allg.: Aerodynamik = f (Windgeschw. + -richtung Pitchinkel, Drehzahl)			
[Querkraft FYB]	--		
Schwenkbiegung MzB	Schräganströmung, lokale Böen, Windgradient, Turm-einfluss, Triebstrangtorsionsschwingungen	+Blatt +mit zunehmendem Rotordurchmesser	direkt: DMS, indirekt: Durchbiegung optisch/mech. Beschleunigung in Blatt
Schubkraft FzB	Schräganströmung, lokale Böen, Windgradient, Turm-einfluss, Triebstrangtorsionsschwingungen	o Blatt ++Blatt	direkt: DMS, indirekt: Durchbiegung optisch/mech. Beschleunigung in Blatt
Schlagbiegung MyB	Schräganströmung, lokale Böen, Windgradient, Turm-einfluss		
Rotorzentrum			
[Querkräfte FxR, FyR]			
Schubkraft FzR	Ungleiches MzBi	-	
Giermoment MxR	Summe MyBi + MzBi	o Rotorlagerung	direkt: DMS Welle, Hauptlager, indirekt: Wegaufnehmer bei elast. Rotorhauptlagerung
Nickmoment MyR	Summe MyBi + MzBi	+Gondel	direkt: DMS Welle, indirekt: Wegaufnehmer bei elast. Rotorlagerung
Drehmoment MzR	Summe MzBi	+Gondel, Getriebe	direkt: DMS Welle, indirekt: Wegaufnehmer bei elast. Rotorlagerung
Turmkopf			
[Querkraft FyT]	FyR, MzR, Windlast Turm	-Turm	direkt: DMS Turmfuß, indirekt: Durchbiegung, z.B. optisch, Beschleunigung im Turmkopf
Schubkraft FzT	FzR, MyR, Windlast Turm, Turm- und Gondeltragheit	+Turm	direkt: DMS Turmfuß, indirekt: Durchbiegung, z.B. optisch, Beschleunigung im Turmkopf
Giermoment MxT	MxR	+Azimutalsystem	direkt: DMS Turmkopf, indirekt: Beschleunigung in Gondel(-heck)
Nickmoment MyT	MyR	-Turm, Azimutalsystem	indirekt: Beschleunigung in Gondel (-heck)
Drehmoment MzT	MzR	-Azimutalsystem	

Anmerkungen: [...] von geringer Bedeutung
 *1) ohne statische (Gewichts-)Lasten
 *2) Bewertung von kein Einfluss bis dominierender Einfluss: --, -, o, +, ++

FIG. 5 A

Dyn. Lastkomponente *1)	Meßgröße Alternativkonzept	Stellgröße für Lastreduktion
Rotorblätter (i=1 bis N)		
[Querkraft F_{yB}]		
Schwenkbiegung M_{zB}	Schwenkgelenk: Schwenkwinkel	[Drehzahl], [Azimutwinkel], [Pitchwinkel] Generatormoment
Schubkraft F_{zB}		
Schlagbiegung M_{yB}	Schlaggelenk: Schlagwinkel	Drehzahl, Pitchwinkel, [Azimutwinkel]
Rotorzentrum		
[Querkräfte F_{xR}, F_{yR}]		
Schubkraft F_{zR}		kollektives Pitchen, Drehzahl
Giermoment M_{xR}	Pendelnabe: Pendelwinkel	selektives Pitchen
Nickmoment M_{yR}	Pendelnabe: Pendelwinkel	selektives Pitchen
Drehmoment M_{zR}		kollektives Pitchen, Generatormoment
Turmkopf		
[Querkraft F_{yT}]		[Generatormoment], [Azimutwinkel]
Schubkraft F_{zT}		kollektives Pitchen, Drehzahl
Giermoment M_{xT}	free yaw: Azimutwinkel	selektives Pitchen
Nickmoment M_{yT}	Nickgelenk: Nickwinkel	selektives Pitchen
Drehmoment M_{zT}		kollektives Pitchen, Generatormoment

Anmerkungen: [...] von geringer Bedeutung
 +1) ohne statische (Gewichts-)Lasten
 *2) Bewertung von kein Einfluss bis dominierender Einfluss: -, -, o, +, ++

FIG. 5 B